文章编号:1000-4939(2023)04-0855-10

预制装配式管廊的施工力学性能研究

胡卓[1,2],谢忠球[1,2],吴敬龙[1,2],江莲子[1,2]

(1.中南林业科技大学土木工程学院,410000 长沙;2.中南林业科技大学岩土工程研究所,410004 长沙)

摘 要:以吉首市综合管廊一期工程为背景,基于预制管廊施工回填过程中的原型观测试验和ABAQUS中的"生死单元"功能,建立管廊施工回填过程的三维动态数值模型,研究施工回填过程中装配式管廊的受力变形特性。结果表明:回填阶段管廊结构受力变形呈"两阶段"变化,管廊覆土深度小于2 m时,管廊结构整体上受力变形较小,管廊覆土深度大于2 m时,管廊结构受力变形基本呈线弹性增长;覆土荷载对预制段、现浇段、预制段与现浇段搭接3种不同断面处的管廊结构产生的纵向受力变形整体上大于横向变形,管廊结构顶板和底板跨中位置受力变形明显;就断面变形差异而言,预制段与现浇段搭接处横向受力变形明显。考虑施工过程中管廊的受力变形特性,在管廊结构设计时,对管廊结构顶板和底板的跨中、预制段承插口、尤其是预制段与现浇段搭接等部位需加以特别考虑。

关键词:预制装配式;管廊;回填观测;数值模拟;裂缝;受力变形

中图分类号:TU990.3 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.015

Stress deformation characteristics of prefabricated underground pipe gallery during filling

HU Zhuo[1,2],XIE Zhongqiu[1,2],WU Jinglong[1,2],JIANG Lianzi[1,2]

(1. College of Civil Engineering,Central South University of Forestry and Technology,410000 Changsha,China;
2. Institution of Geo-technical,Central South University of Forestry and Technology,410004 Changsha,China)

Abstract:Taking the first phase of the integrated pipe gallery in Jishou City as the background,based on the prototype observation test during the backfilling process of the prefabricated pipe gallery and the "life and death unit" function in ABAQUS,a three-dimensional dynamic numerical model of the pipe gallery backfilling process was established and the construction was studied. Force and deformation characteristics of fabricated pipe gallery during backfilling. The results show that the stress and deformation of the pipe gallery structure in the backfilling stage show a "two-stage" change. When the pipe gallery cover soil depth is less than 2 m,the pipe gallery structure as a whole bears less force and deformation. When the pipe gallery cover soil depth is greater than 2 m,the pipe gallery structure is stressed. The deformation is basically linear elastic growth;the longitudinal stress and deformation of the pipe gallery structure at the

收稿日期:2021-05-13 **修回日期**:2021-07-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51408617);湖南省省级工程建设新技术研发与软科学研究计划资助项目(No. 430S00711/2018-42557)
通信作者:谢忠球,教授。E-mail:v13973179389@163.com
引用格式:胡卓,谢忠球,吴敬龙,等. 预制装配式管廊的施工力学性能研究[J]. 应用力学学报,2023,40(4):855-864.
HU Zhuo,XIE Zhongqiu,WU Jinglong,et al. Stress deformation characteristics of prefabricated underground pipe gallery during filling[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(4):855-864.

three different cross-sections of the precast section, the cast-in-situ section, the precast section and the cast-in-situ section caused by the covering soil load is generally greater than the horizontal deformation. The force and deformation are obvious at the mid-span position of the bottom plate; in terms of the difference in section deformation, the transverse force and deformation at the overlap of the precast section and the cast-in-situ section are obvious. Considering the stress and deformation characteristics of the pipe gallery during the construction process, when designing the pipe gallery structure, special measures should be taken for the mid-span, precast section sockets of the top and bottom plates of the pipe gallery structure, especially the overlap between the precast section and the cast-in-place section.

Key words: prefabricated; pipe gallery; backfill observation; numerical simulation; crack

地下综合管廊的规范化、模块化、产业化是推进地下综合管廊预制拼装技术发展的重要基础。当前国内外诸多学者[1-2]对预制装配式管廊的结构受力性能进行了研究。MARSHALL 等[3]从管廊覆土埋深、土体刚度、管廊间搭接处的传力方式等方面对地下综合管廊与土体的相互作用进行了理论推导与分析。岳庆霞等[4]在推导动力方程的基础上,通过三维数值模拟分析,得出接触面条件和边界条件等因素对管廊结构受力变形的影响;胡翔等[5]以上海世博会园区综合管廊工程为研究背景,对传统分块卧式预制装配式预应力管廊接头的力学性能进行了详细的研究;苟文锦[6]分别对土体自重、静荷载和车辆荷载作用下埋地管道的力学性状和变形特性进行研究,认为覆土填埋管道理论上存在一个最佳埋深,覆土填埋管线危险点与管道两端约束条件有关;薛伟辰等[5,7]在足尺试验的基础上,对预制装配式预应力综合管廊进行研究,提出了预制装配式预应力综合管廊间搭接头的设计方法,表明在4侧壁等值对称荷载作用下,管廊接头具有较好的延性、变形能力,但管廊拼缝处防水性能及整体受力性能较弱,其试验条件不能反应实际结构受力状态。

现有研究成果主要是基于室内模型试验在抗震、车辆荷载及静力分析等方面对管廊结构的截面形式、刚度、配筋进行优化分析。这些成果为预制拼装综合管廊受力性能的研究与设计提供了基础。但现有工程中发现,预制装配式管廊在现场安装回填过程中和回填压实后,管廊结构出现较多的横、纵向裂缝、环向裂缝等病害现象,其产生的主要原因尚不明确。

本研究基于吉首市综合管廊一期工程 PPP (public-private-partnership 也称为“公私合作模式”)项目工程,在对施工回填过程管廊结构应变及周边土压力进行监测试验的基础上,基于管土相互作用,通过建立三维数值模型,研究分析不同回填工况下管廊周边土体应力分布变化和管廊结构各部位的受力变形规律,为管廊结构的设计、施工提供参考。

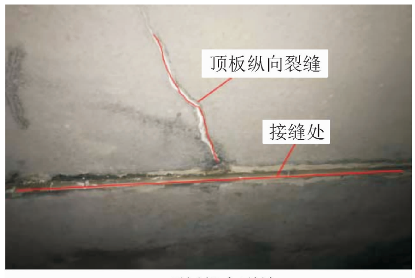
1 试验设计

1.1 试验概况

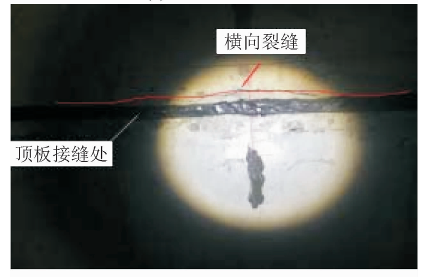
项目位于建新东路与乾城大道交叉处至乾南产业园及高铁新城路网工程起点,设计桩号为 K0 + 000 ~ K0 + 803.807,属于山岭重丘区地形。现场调查及统计发现,管廊回填压实后,管廊结构内部顶板、底板和侧壁出现许多结构裂缝,裂缝形式为以下3种:横向裂缝、纵向裂缝和斜向裂缝(见图1),其中,横向裂缝主要发生在管廊预制段承口端和插口端的搭接口处以及预制现浇段搭接口处,严重时横向裂缝贯穿形成成环向裂缝,引发渗漏水;纵向裂缝主要表现形式为预制管廊顶板和底板跨中处向预制管廊中部纵向延伸;斜向裂缝主要发生在管廊两侧壁。裂缝形态大致处于张开状态,裂缝宽度在 0.02 ~ 1.8 mm 之间,多数为横向和纵向裂缝,斜向裂缝较少。

试验选取在桩号为 K0 + 500 ~ K0 + 560 现浇段跨中处、现浇与预制连接搭接口处以及预制与预制连接搭接口处3个位置进行传感器埋设,全过程监测施工回填阶段和回填压实后车辆荷载对管廊结构应变的影响及周边土压力的变化情况。该地段管廊标准断面上的覆土深度为 2.5 m(按照道路设计标高计算),布置于道路旁人行道以内(含人行道)的车行道下,为单舱矩形框架结构(见图2),高(H) × 宽(b) = 3.2 m × 3.6 m,单节长度 3.125 m,壁厚 0.3 m,四角加腋 0.2 m;材料采用混凝土 C40,钢筋 HRB400;顶板配筋量为跨中底筋 6 根 16/m,面筋 5

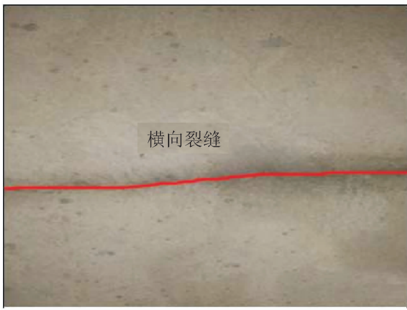
根 16/m；设计使用年限：100 年。



(a) 顶板纵向裂缝



(b) 顶板横向裂缝



(c) 底板横向裂缝



(d) 侧壁斜向裂缝

图 1　地下综合管廊结构常见问题

Fig. 1　Common problems of underground pipe gallery structure

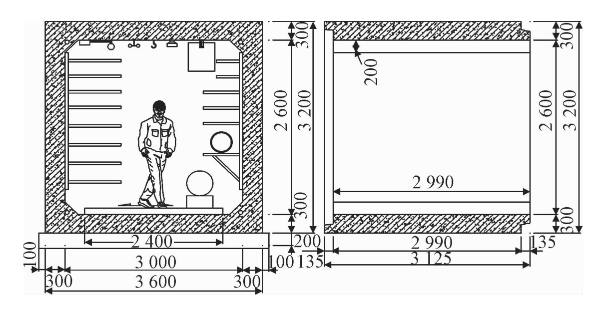
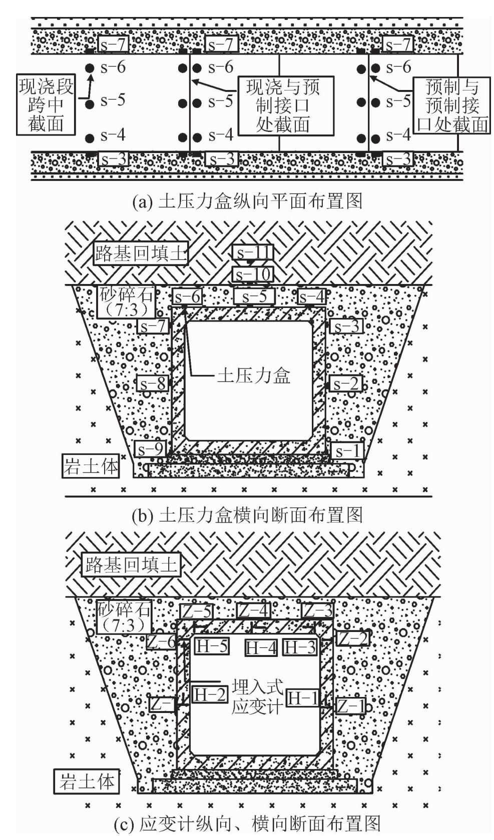


图 2　预制管廊标准断面图

Fig. 2　Standard section of prefabricated pipe gallery

1.2　试验测点布置与测试

测点布置在 3 个不同横断面上，分别为预制段管廊搭接口处、预制段管廊与现浇段管廊搭接口处和现浇管廊跨中处。在 3 个不同横断面处两侧对称布置土压力盒，沿管廊外侧侧壁底端、侧壁跨中、侧壁顶端位置依次布置 1 个土压力盒；在管廊顶板外侧两端和跨中各布置 1 个土压力盒；在管廊顶板跨中位置上方覆土 0.5、1.0 m 处各布 1 个土压力盒；共计 11 个土压力盒，布点位置见图 3(a) ~ (b)。同时在现浇管廊跨中断面埋设应变计，应变计纵向埋设在管廊顶板左右腋角处和跨中处以及侧板跨中和上腋角处，共计 7 个；横向埋设在顶板左右腋角和跨中位置以及侧板跨中位置，共计 5 个，布点位置见图 3(c)。



(a) 土压力盒纵向平面布置图

(b) 土压力盒横向断面布置图

(c) 应变计纵向、横向断面布置图



(d) 土压力盒现场埋设



(e) 应变计现场绑扎

图3 各测点横纵向断面布置图

Fig. 3 Layout of transverse and longitudinal sections of each measuring point

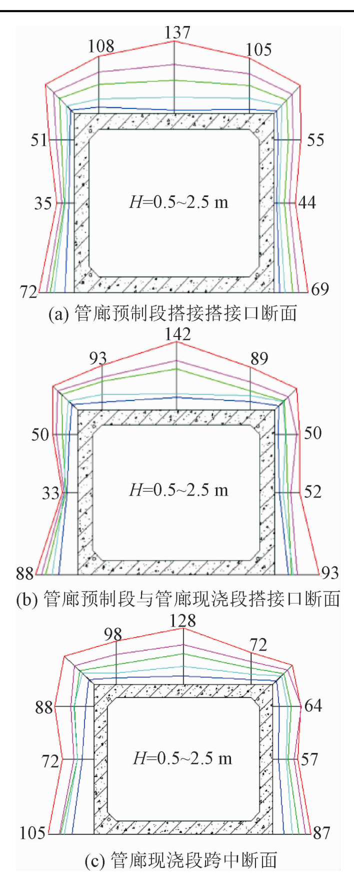
各测点数据的读取根据管廊覆土回填施工阶段进行(按覆土深度为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m共5个阶段进行测试),每次测试都是在路基压实平整后1周进行读取。

2 现场试验分析

2.1 回填阶段管廊周边管-土接触面法向应力分析

在管廊覆土回填施工阶段中,在路基压实平整工况下分别读取管廊顶板覆土深度为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m的地下管-土接触面的法向土应力数据,得到不同覆土深度工况下的应力分布变化规律。图4(a)~(c)体现了在3个不同横断面处(预制段搭接口处、现浇管廊与预制管廊搭接口处和现浇管廊跨中处)不同覆土深度下周边法向土应力分布变化曲线。

从图4(a)~(c)中可以看出,不同断面管廊-土体接触面的法向土应力分布规律相似,管廊周边法向土应力顶板跨中最大,侧板中间位置最小,随着管廊顶板覆土深度增加差异更加明显。随着覆土深度的增大,管廊顶板的支撑作用及其对周围土体竖向沉降变形的影响逐渐增强,管廊顶部的法向应力逐渐增大,且大于管廊侧板的法向土应力。管廊侧板中间及上部位置的法向土应力相对较小,这与管廊两侧上部土体的侧向作用减弱以及管廊顶板支撑上部土体形成的土拱效应影响有关。对比3个断面管廊两侧法向土应力,发现左侧应力略大于右侧应力,这与左侧覆土深度略高于右侧路面机动车道有关。



(a) 管廊预制段搭接搭接口断面

(b) 管廊预制段与管廊现浇段搭接口断面

(c) 管廊现浇段跨中断面

图4 不同断面处管-土接触面法向土应力分布变化曲线(单位:kPa)

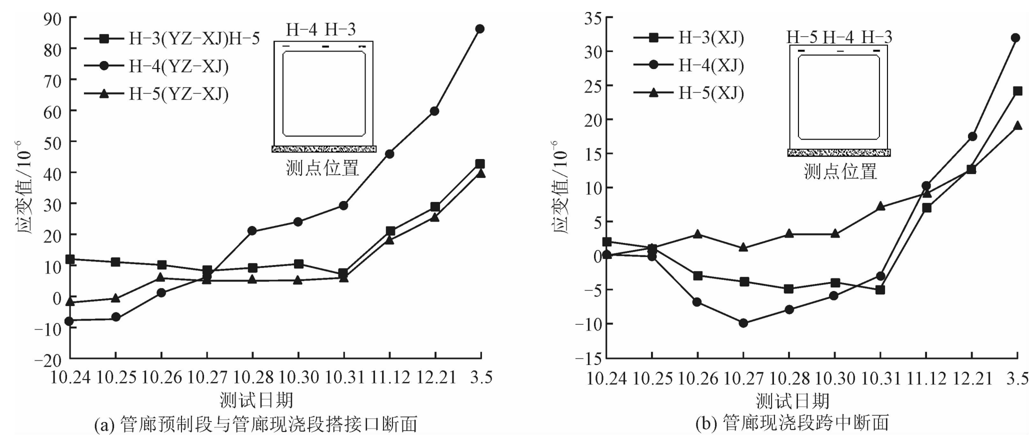
Fig. 4 Normal soil stress distribution curve of pipe-soil interface at different sections(unit:kPa)

2.2 回填阶段管廊结构受力变形分析

分别对管廊现浇段跨中处和现浇管廊段与预制管廊段搭接处结构的受力变形进行研究。基于图5~6中绘制的管廊结构在不同覆土深度的作用下应变变化曲线,可分析管廊结构在不同覆土深度作用下受力变形的规律。

对比图5(a)和(b)得出,在覆土深度2.0 m下,顶板结构的应变变化相对较小。当覆土深度达到2.5 m时,管廊结构的应变增大,呈线性增长,且顶板跨中处变化比顶板腋角处明显,表明当覆土高度H=2.5 m时,管廊顶板受覆土深度影响的横向受力变形明显增大。预制管廊与现浇管廊搭接口断面顶板的横向应变变化远大于现浇管廊跨中断面,表明预制管廊与现浇管廊搭接处的刚度小,经常发生不均匀沉降面。

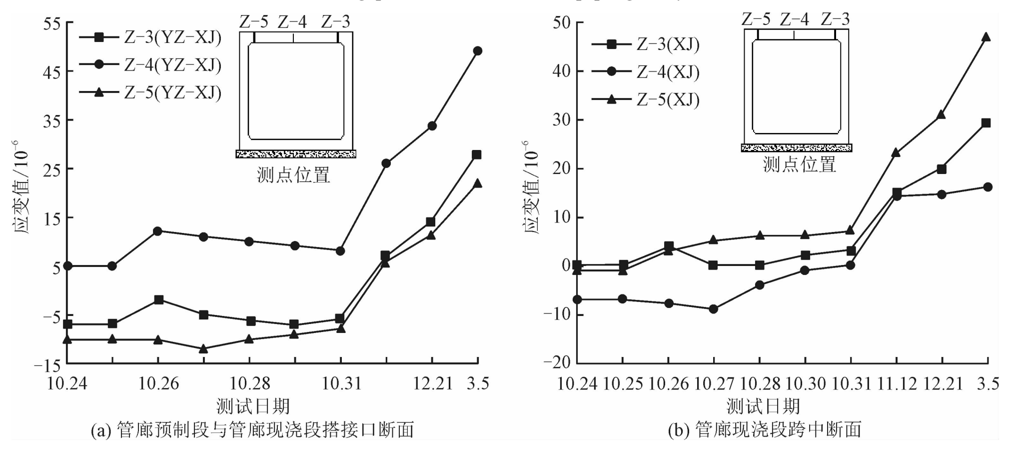
对比图6(a)和(b)得出,管廊跨中和左腋角处的纵向变形略小于管廊顶板右腋角处,离路面越远,管廊顶板的纵向变形越大,这与地表车辆荷载作用相关。



(a) 管廊预制段与管廊现浇段搭接口断面　(b) 管廊现浇段跨中断面

图 5　不同断面处管廊顶板各测点位置的横向应变曲线

Fig. 5　Transverse strain curves of measuring points on the roof of pipe gallery at different sections in back-filling stage



(a) 管廊预制段与管廊现浇段搭接口断面　(b) 管廊现浇段跨中断面

图 6　不同断面处管廊顶板各测点位置的纵向应变变化曲线

Fig. 6　Longitudinal strain curve of measuring points on the roof of pipe gallery at different sections

对比图 5(a)和图 6(a)得出,现浇预制管廊搭接口处,管廊的结构顶板的纵向变型小于横向变型;而对比图 5(b)和图 6(b)得出,管廊结构现浇段跨中的横向变形小于纵向变形,这与地下综合管廊的纵向尺度远大于横向尺度,导致其纵向刚度相对薄弱有关。

3　三维数值模拟

3.1　模型建立

利用 ABAQUS 软件,结合工程实际建立考虑施工回填全过程的管廊-土体三维实体模型,试验按 1∶1建立模型,设定土体长 × 宽 × 高 = 60.15 m × 36 m × 30 m,管廊为 20 节立式预制管廊,单节尺寸为长 × 宽 × 高 = 3.15 m × 3.6 m × 3.2 m。对地下综合管廊混凝土结构、垫层、钢绞线锚固端采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R);考虑水头高度、地下水渗流、孔隙水压力等因素对土体变形的影响,土体采用 C3D8P 进行模拟;对管廊结构体内的内置钢筋和预应力钢绞线采用两节点线性三维空间桁架单元(T3D2)模拟,各结构模型参数如表 1。

表 1　管廊及附属结构材料模型参数

Tab. 1　Material model parameters for pipe galleries and accessory structures

结构名称	型号	ρ/(kg·m^{-3})	E_0/MPa	ν	抗拉强度设计值 f_t/MPa
立式预制管廊	C40 防水混凝土	2 500	32 500	0.2	2.39
钢筋	HRB400 C14/16/20	7 860	200 000	0.3	540
预应力钢绞线	Φ^s15.2 mm(1 × 7)	7 921	195 000	0.3	1 860
管底垫层	C20 混凝土	2 000	60	0.26	1.1

模型整体均采用空间直角坐标系,XOZ 平面为水平面,Y 方向为竖直方向。考虑土体的竖向沉降

位移,不限制左右两侧 Y 方向竖直位移,仅限制平面 X 方向水平位移,平面前后两侧限制 Z 方向水平位移,底部限制3个方向的位移,土体表面不设位移约束。地表面设置为排水边界,其它表面为不排水边界,如图7所示。

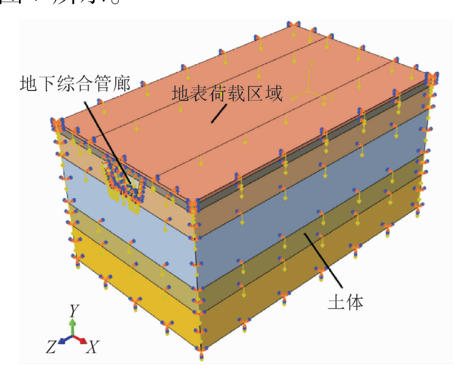


图7 地下综合管廊三维实体模型

Fig.7 Three-dimensional solid model of underground pipe gallery

通过设置种子数量及单元大小,对土体、垫层、钢绞线锚固端及工字钢采用结构化网格划分,钢筋和预应力钢绞线采用自由网格划分, 管廊混凝土结构采用结构化网格和扫掠网格2种方法对网格进行细化,如图8所示。

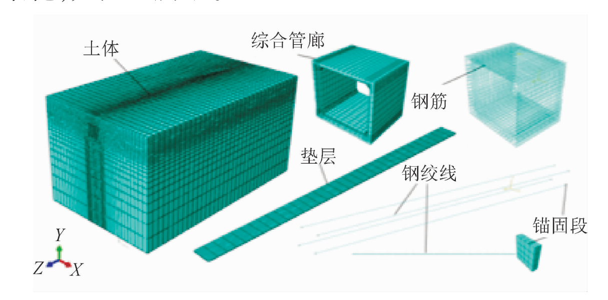


图8 管廊-土体相互作用三维模型网格划分

Fig.8 Mesh generation of three-dimensional model of porch-soil interaction

3.2 材料本构模型选取

根据工程地质资料中有关土体的实际参数,材料本构模型的选取参考文献[6-7]中针对不同土体采用M-C模型和扩展D-P模型2种模型相结合的方式,具体参数见表2~3,预制管廊混凝土材料采用ABAQUS中的损伤塑性模型,钢筋和钢绞线分别采用强化双折线和三折线弹塑性模型。

表2 各层土体的模型参数

Tab.2 Parameters of different soil models

土质类型	密度 $\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	孔隙比 e	渗透系数 $k/(\mathrm{m\cdot d^{-1}})$
路面材料	2 400	1 400	0.35	–	–	–	–
素填土	1 930	5.8	0.27	25	18	–	0.05
砂碎石	2 150	15	0.25	1	35	0.6	0.3
填筑土	2 000	80	0.18	45	25	–	0.09
粉质黏土	1 900	35	0.3	20	14	0.8	0.06
强风化灰岩	2 400	*150	0.3	356	33	–	0.015
中风化灰岩	2 600	*300	0.26	1 000	38	–	0.008

注:带“*”者为经验数据,弹性模量 E 与压缩模量 E_s 间的换算关系为 $E=\dfrac{2(1-\nu^2)}{1-\nu}E_s$。

表3 Drucker-Prager模型土体参数[8-9]

Tab.3 Soil parameters of Drucker-Prager model[8-9]

土质类型	c/kPa	M-C型 φ/(°)	ν	P型 β/(°)	K	剪胀角 ψ/(°)	单轴受压屈服应力 σ_c^0/kPa
素填土	25	18	0.27	34.6	0.813	17.3	68.81
填筑土	45	25	0.18	44.5	0.778	22.3	141.24
粉质黏土	20	14	0.30	27.8	0.851	13.9	51.19

3.3 接触面相互作用类型模拟

考虑管廊-土体间的相互作用,利用ABAQUS软件构建主从接触面,主从关系为:管廊 > 垫层 > 土体;法向作用设置为硬接触,切向作用采用罚函数,并设定摩擦系数模拟分析管-土的相互作用。摩擦系数 μ 的取值参考文献[10],即

$$\mu=\frac{\lambda_1}{H/B-\lambda_2}+\lambda_3 \tag{1}$$

其中:H 为埋深;B 为截面宽度;λ_1、λ_2 和 λ_3 为拟合

参数[11],分别取 0.757、0.462、0.205。

利用 ABAQUS 中 Merge 命令建立钢筋网骨架,采用 * Embedded region 约束对管廊混凝土结构和钢筋进行相互约束,用内在约束 MPC 连接钢绞线锚固端实体单元中心节点和预应力钢绞线桁架单元的端部节点,再将钢绞线锚固端与模型两端的两节管廊采用 Tie 约束进行绑定,并利用 Predefined Field 对预应力钢绞线设置初始应力模拟预应力张拉过程,见图 9。

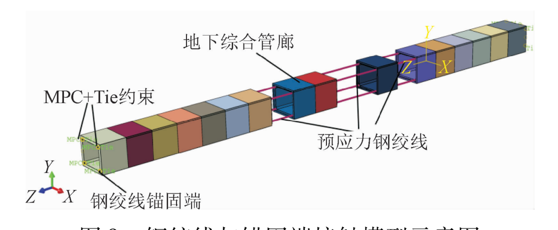


图 9　钢绞线与锚固端接触模型示意图

Fig. 9　Model diagram of contact between strand and anchorage end

3.4　生死单元

基于能真实地模拟地下综合管廊施工不同回填深度动态变化过程,得到各回填工况管廊周边土应力对应的变化情况,采用 ABAQUS 有限元数值模拟软件中的"生死单元"功能通过"激活"(model change, reactivated)和"杀死"(model change, remove)的方式模拟管廊和管廊开挖与回填的土体。首先,通过"杀死"功能关闭管廊和回填土体等模拟,尽可能模拟初始复合地基状态;然后,通过"激活"功能,依次激活已设置好的砂碎石、垫层、管廊、回填土体网格等;最后,进行重力加载,并模拟碎石摊铺、垫层、管廊浇筑与安装、土体回填、路基压实等工况。地下综合管廊施工回填动态模拟过程如图 10 所示,施工回填模拟分级加载示意图如图 11 所示。

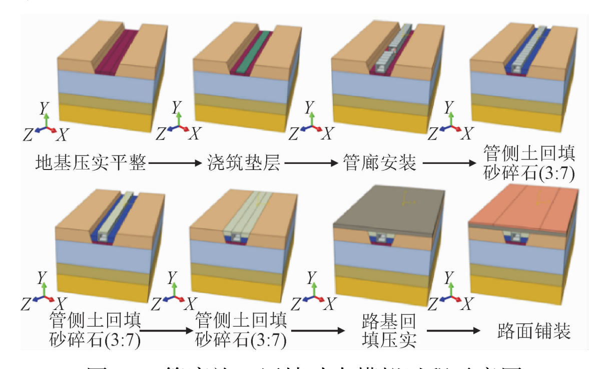


图 10　管廊施工回填动态模拟过程示意图

Fig. 10　Diagram of dynamic simulation process for backfilling of pipe gallery

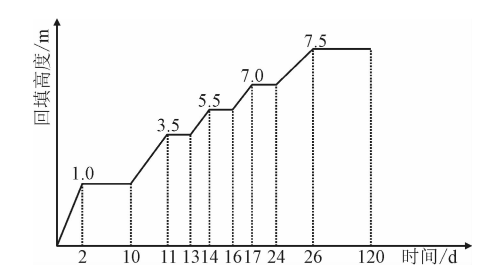


图 11　施工回填模拟分级加载示意图

Fig. 11　Hierarchical loading diagram of construction backfill simulation

4　计算结果分析

4.1　管-土接触面法向应力模拟验证分析

由图 12 得出,管-土接触面间的法向应力随着覆土高度的增加呈线性增长。由图 12(a)得出,同样填土高度,腋角法向应力小于顶板跨中处。随着填土高度的增加,两者应力产生差异,覆土荷载对顶板跨中影响较大,易产生应力集中区域,与该工程现场实际检测的有关裂缝等病害问题统计出的数据基本是吻合的,表明顶板跨中出现横纵向裂缝多,受力明显。由图 12(b)得出管廊侧板底端处应力大于其跨中处应力。

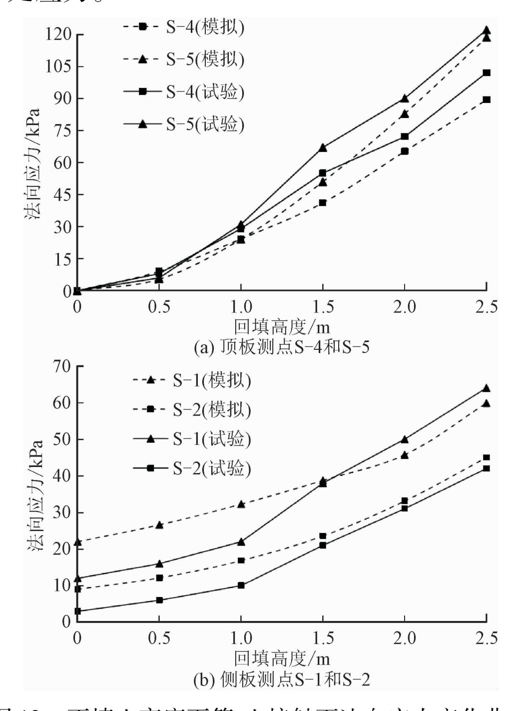


图 12　不填土高度下管-土接触面法向应力变化曲线

Fig. 12　Normal stress curves of pipe-soil interface at different filling heights

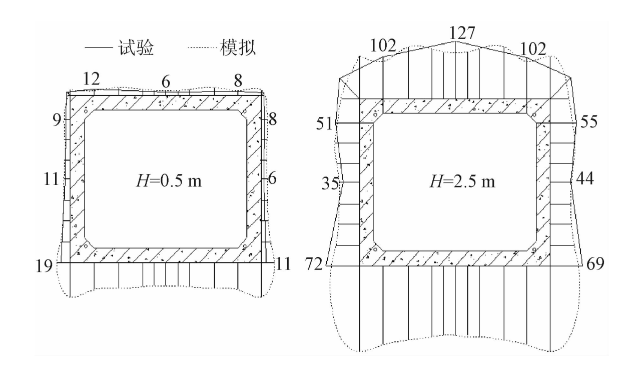


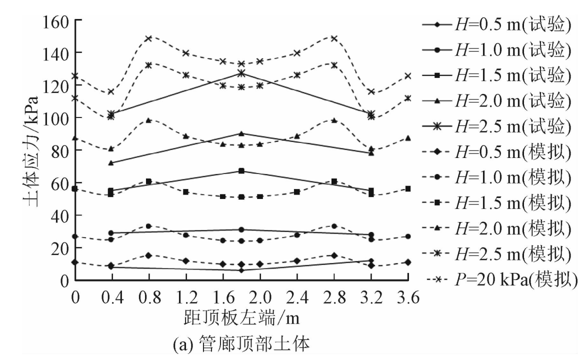
图13 填土高度为0.5 m和2.5 m下管-土接触面法向应力分布曲线

Fig. 13 Normal stress distribution curves of pipe-soil interface under filling height of 0.5 m and 2.5 m

从图13中可以发现，管廊底部土体应力最大，管廊顶板、侧板应力相对较小，表明管廊结构的顶板和底板易产生结构变形，在设计时应重点考虑顶板和底板的刚度，从而提高抗变形能力。

4.2 不同位置土体应力变化规律分析

分析图14(a)得出，管廊跨中与腋角之间和管廊两端的上部土体应力较大，管廊顶部左右腋角处上部土体应力相对较小。覆土高度的增加使得管廊顶板支撑作用增大，周围土体的土拱效应对两侧土体的应力增加相对削弱；由于管廊和土体的刚度不同，使得两侧土体竖向压缩变形量大于管廊中间变形，同时也受管-土摩擦作用对管廊产生包裹约束作用影响。分析图14(b)发现，管廊两侧中间土体应力较小，这与管廊基坑开挖放坡时对两侧土体采用钢筋网片、锚杆安装及喷射混凝土护坡和管廊顶部支撑作用形成的土拱效应等有关。分析图14(c)得出，管廊底部土体应力相对顶板和两侧土体应力较大，与管廊顶板的土拱效应和土体的包裹约束作用，底板跨中向上弯曲变形使得中间土体应力相对减小，进而导致两端土体应力增大有关。



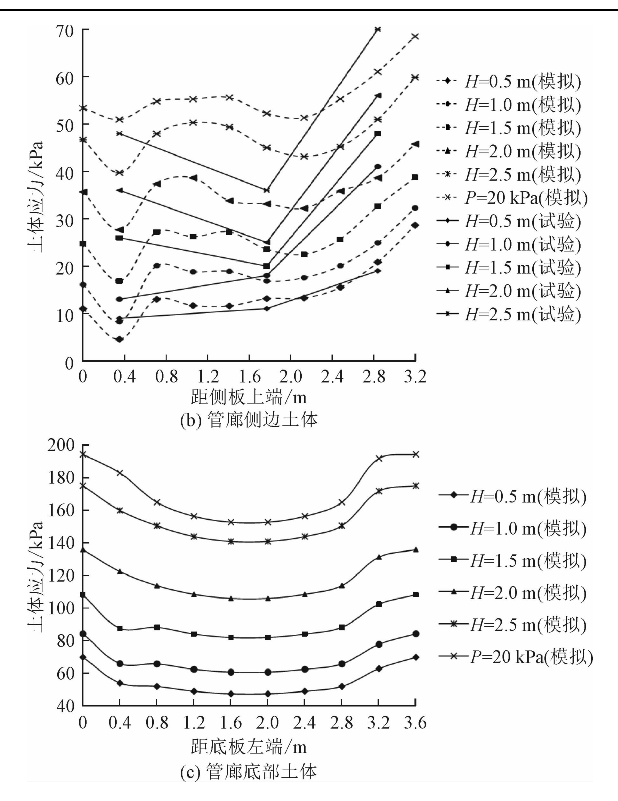
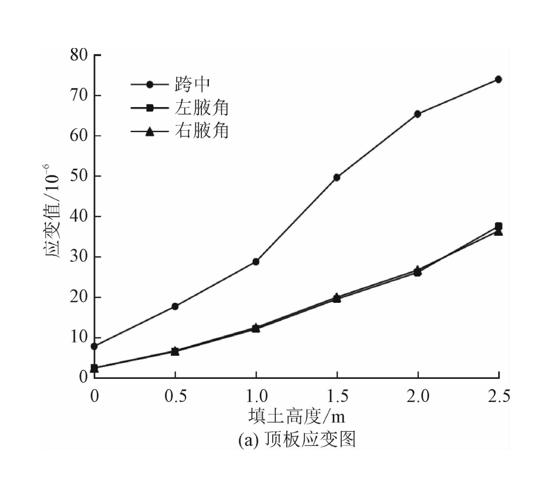


图14 管廊周边不同位置土体应力分布变化曲线

Fig. 14 Stress distribution curve of soil at different positions around pipe gallery

4.3 管廊结构内外侧受力变形规律分析

为分析回填阶段填土对管廊结构内外侧受力变形的影响，绘制不同填土高度下预制段搭接口处管廊结构内侧顶(底)板跨中和左右腋角位置处的应变变化曲线，如图15(a)~(c)所示。图15(d)为填土高度 $H=2.5$ m时，预制段管廊结构顶(底)板内外侧的应力云图，图16为管廊承插口处的横向应力云图。



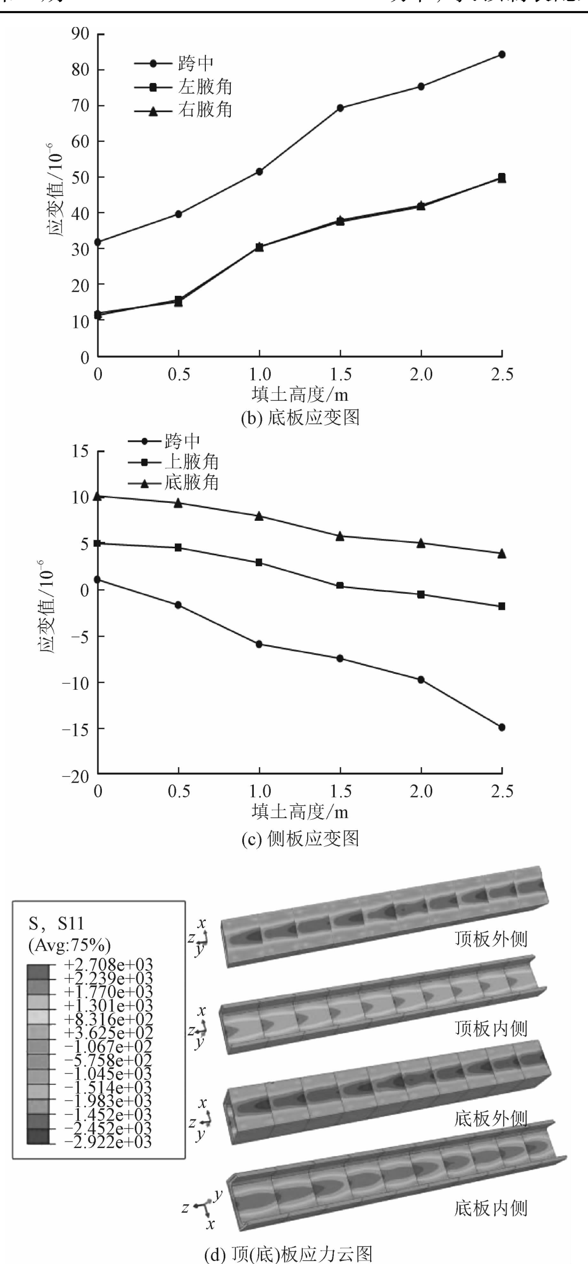


图 15　不同填土高度下管廊各关键点应变变化曲线

Fig. 15　Strain curves of the key points of the pipe gallery at different filling heights

由图 15 得出,随着填土高度的增加,管廊顶(底)板以及侧板内侧跨中和左右腋角位置应变基本呈线弹性增长,底板和顶板跨中处变形明显较大,且底板变形大于顶板变形,侧板处应变和左右腋角的应变相对较小;从图 15(d)应力云图也可看出顶、底板内外两侧跨中处均应力集中明显;图 15(c)中侧板应力变化与顶板和底板应力曲线不同,侧板跨中处由受拉到受压,其上端腋角和底端腋角处的拉应变减小,表明在前期回填过程中,前期上部覆土少,管廊两侧土体侧向作用明显,使得管廊两侧板内侧受拉,后期上部土体对管廊顶板和底板作用增强,使得管廊侧板内侧面由受拉变为受压。对比图 15(d)和图 16 得出,插口一端是顶板和底板主要应力集中区域外侧。承口一端主要应力集中在区域内侧。云图与该工程现场实际检测的有关裂缝等病害问题统计出的数据基本是吻合的,表明顶板跨中出现横纵向裂缝多,受力明显。

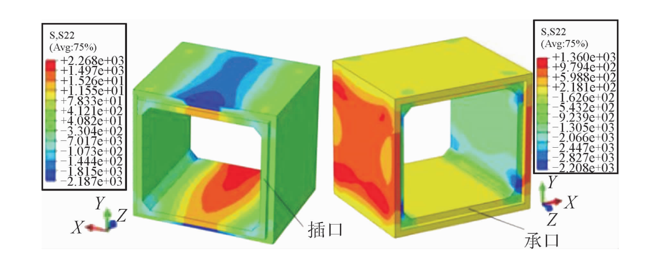


图 16　管廊承插口处的横向应力云图

Fig. 16　Transverse stress nephogram of the bell and spigot of pipe gallery

5　结　论

1)管廊预制段搭接口处、预制现浇段搭接口处以及现浇跨中处 3 种不同断面管廊-土体接触面的法向土应力分布规律相似,在顶板覆土深度较小时,管廊顶板法向土应力小于侧板底端的法向土应力;当覆土深度不断增加,管廊顶部的法向应力变化大于管廊侧板的法向土应力变化,管廊两侧受力不均。

2)管廊与土体接触面法向应力试验值与模拟值基本吻合,表明基于生死单元模拟动态施工回填过程的数值模型能很好地反映管廊与土体间的相互作用。管廊顶部和底部在地质情况稳定、地基均匀地段,周边土体应力随着覆土深度增加呈线性增长且影响最大。

3)回填阶段管廊结构受力变形呈“两阶段”变化,前期($H<2.0$ m)管廊顶板覆土较少时,管廊结构整体上受力变形较小,后期随着填土高度的不断增加,管廊结构横纵向受力变形逐渐增大,基本呈线弹性增长,其中,管廊顶板跨中处横向受力变形最大。此外,覆土荷载对 3 种不同断面处管廊结构产生的纵向受力变形整体上大于横向变形;就断面差异而言,预制现浇段搭接口处横向受力变形明显,需采取加固措施。

4)施工回填过程中,管廊结构的受力变形前期变化小,后期呈线弹性增长,管廊顶板和底板跨中位置变形明显,且底板大于顶板,腋角和侧板位置变形相对较小,顶板和底板应力集中区域外侧主要集中

于插口一端,内侧主要集中于承口一端,与实际裂缝检测统计情况基本吻合,设计时需加以考虑。

参考文献:

[1] 吴敬龙,谢忠球,徐健,等.单舱矩形立式预制综合管廊力学性能研究[J].应用力学学报,2020,37(3):1065-1072.
WU Jinglong,XIE Zhongqiu,XU Jian,et al. Mechanical properties of single-cabin rectangular vertical prefabricated pipe gallery[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(3):1065-1072(in Chinese).

[2] 马文峰.单舱矩形综合管廊立式预制技术研究[Z].湖南省:通号建设集团有限公司,2018-11-30.

[3] MARSHALL A M,HAJI T. An analytical study of tunnel-pile interaction[J]. Tunnelling and underground space technology,2015,45:43-51.

[4] 岳庆霞,李杰.地下综合管廊地震响应研究[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(3):285-290.
YUE Qingxia,LI Jie. Research on utility tunnel seismic response[J]. Journal of Tongji University(natural science),2009,37(3):285-290(in Chinese).

[5] 薛伟辰,胡翔,王恒栋.上海世博园区预制预应力综合管廊力学性能试验研究[J].特种结构,2009,26(1):105-108.
XUE Weichen,HU Xiang,WANG Hengdong. Experimental studies on mechanical properties of PPMT in Shanghai Expo area[J]. Special structures,2009,26(1):105-108(in Chinese).

[6] 苟文锦.车行道下方埋地管道的力学性状研究[D].重庆:重庆大学,2016.

[7] 胡翔,薛伟辰.预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(5):29-37.
HU Xiang,XUE Weichen. Experimental study of mechanical properties of PPMT[J]. China civil engineering journal,2010,43(5):29-37(in Chinese).

[8] 刘金龙,夏勇.关于"基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究"的讨论[J].岩土工程学报,2006,28(12):2168-2169.
LIU Jinlong,XIA Yong. Discussion on "studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering"[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2006,28(12):2168-2169(in Chinese).

[9] 朱向荣,王金昌. ABAQUS软件中部分土模型简介及其工程应用[J].岩土力学,2004,25(增刊2):144-148.
ZHU Xiangrong,WANG Jinchang. Introduction to partly soil models in ABAQUS software and their application to the geotechnical engineering[J]. Rock and soil mechanics,2004,25(S2):144-148(in Chinese).

[10] 孔位学,芮勇勤,董宝弟.岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J].岩土力学,2009,30(11):3278-3282.
KONG Weixue,RUI Yongqin,DONG Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and soil mechanics,2009,30(11):3278-3282(in Chinese).

[11] 刘巍,徐明,陈忠范. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J].工业建筑,2014,44(增刊1):167-171.
LIU Wei,XU Ming,CHEN Zhongfan. Parameters calibration and verification of concrete damage plasticity model of abaqus[J]. Industrial construction,2014,44(S1):167-171(in Chinese).

[12] WANG J H,YANG Z H. Axial friction response of full-scale pipes in soft clays[J]. Applied ocean research,2016,59:10-23.

(编辑 史淑英)